

к.т.н. Пересада С. М., к.т.н. Ковбаса С. Н.,

Национальный технический университет Украины «КПИ»

Крыжановский В. П., Бовкунович В. С.,

ООО НИПФ «ЭПА»

СИСТЕМА УПРАВЛЕНИЯ МОМЕНТОМ АСИНХРОННОГО ДВИГАТЕЛЯ ДЛЯ ТЯГОВЫХ ЭЛЕКТРОПРИВОДОВ

Введение. За последние десятилетия, благодаря развитию методов и средств управления асинхронными двигателями (АД) за последние десятилетия, асинхронный электропривод практически полностью вытеснил электропривод постоянного в большинстве промышленных применений. Исключением из данной тенденции является электротранспорт. Ввиду длительного срока эксплуатации подвижного состава, как правило, составляющего 25 лет, большинство транспортных механизмов до настоящего времени оборудованы приводом постоянного тока, разработанным в 80-х годах прошлого столетия, т. е. когда технология управления АД только развивалась. Поэтому, разработка асинхронного электропривода для электротранспорта является актуальной научной и практической задачей современной электромеханики.

Выделяют три основных вида городского электротранспорта: троллейбус, трамвай, метрополитен. Для перечисленных транспортных средств основной задачей электропривода является регулирование момента. Электропривод троллейбуса строится с использованием одного двигателя и одного преобразователя частоты на колесную пару. В таком случае возможно прямое применение векторных методов управления АД, что обеспечивает качественное регулирование момента во всем диапазоне скоростей. В случае рельсового электротранспорта, к одному преобразователю частоты подключаются параллельно два двигателя – по одному на колесную пару тележки. В таком варианте подключения прямое применение векторных

алгоритмов управления затруднительно. Естественным выходом является использование частотных алгоритмов управления моментом АД.

Вопросам построения многодвигательного тягового асинхронного электропривода посвящено множество публикаций в мировой литературе (см. [1], [2] а также список литературы в них). Это связано с рядом проблем, полного решения которых до настоящего времени не найдено. Основной проблемой является выравнивание моментов машин получающих питание от одного инвертора, что связано с наличием эффектов буксования колесных пар. Это также является одним из факторов, которые затрудняют применение векторных алгоритмов управления АД в таких системах. Очевидно, что в таком случае необходимо строить специальную, усредненную модель АД.

Данная статья посвящена разработке системы управления моментом АД для использования в рельсовом электротранспорте. Разработанный алгоритм исследован экспериментально и находится в стадии промышленного внедрения.

Функциональная схема системы управления

Функциональная схема тягового электропривода трамвая показана на Рис. 1. Силовая часть выполнена в виде стандартного автономного инвертора напряжения. Питание инвертора осуществляется от контактной сети постоянного тока. К выходу инвертора подключены параллельно два асинхронных двигателя – по одному на колесную пару. На вал каждого из двигателей установлен фотоимпульсный датчик скорости.

Для измерения электрических величин используется четыре датчика тока (три выходных тока инвертора и ток сети) и два датчика напряжения (напряжение сети и звена постоянного тока). Измерение напряжения и тока сети необходимо для организации корректной работы зарядной цепи звена постоянного тока в режимах «обрыва» контактной сети.

Клампер, установленный в звене постоянного тока, необходим для обеспечения эффективного торможения двигателей в режиме, когда

контактная сеть недоступна, и, следовательно, рекуперация энергии в сеть невозможна.

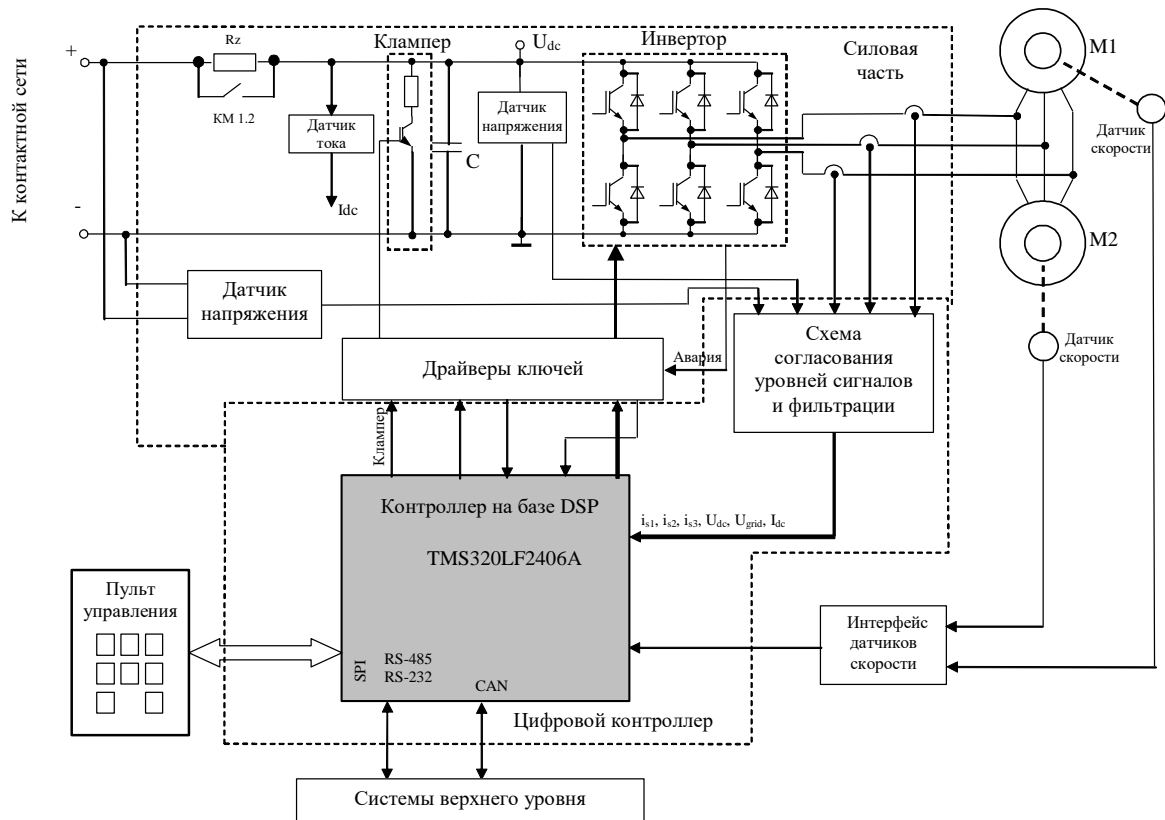


Рис.1. Функциональная схема тягового электропривода трамвая

Унифицированный управляющий контроллер [3] выполнен на основе цифрового сигнального процессора TMS320LF2406A. Контроллер подключен к системе телеметрии вагона, из которой получает задание на тяговый момент и выдает информацию о текущем состоянии электропривода.

Настройка параметров электропривода осуществляется через выносной пульт управления.

Алгоритм управления моментом

Для управления моментом приводных АД, с использованием стандартной модели АД [4], авторами разработан разомкнутый алгоритм, который записывается в виде следующих уравнений:

$$\begin{aligned} u_a &= \eta \cdot (\alpha \psi^* + u_{d1} + u_{d2}) - \xi \cdot (\omega_0 \psi^*) \\ u_b &= \xi \cdot (\alpha \psi^* + u_{d1} + u_{d2}) + \eta \cdot (\omega_0 \psi^*) \\ \dot{\eta} &= -\xi \cdot (\omega_0) \\ \dot{\xi} &= \eta \cdot (\omega_0), \end{aligned} \quad (1)$$

где угловая скорость вращения поля равна

$$\omega_0 = \omega p_n + k_1 M^* + I_c \quad (2)$$

где u_a, u_b – компоненты вектора напряжения статора, ω – угловая скорость ротора (усредненное значение при работе двух машин), p_n – число пар полюсов АД, M^* – заданный момент, ψ^* – заданное значение потокосцепления, I_c – корректирующая компонента для осуществления токоограничения, u_{d1}, u_{d2} – добавочные напряжения возбуждения машины для статического и динамического режимов, $\alpha = \frac{R_1}{L_1}$, где R_1, L_1 – активное сопротивление и индуктивность статора АД, k_1 – настроечный коэффициент.

Подставив (2) в (1), получим алгоритм управления моментом АД в режиме полного потока

$$\begin{aligned} u_a &= \eta \cdot (\alpha \psi^* + u_{d1} + u_{d2}) - \xi \cdot [\psi^* \cdot (\omega p_n + k_1 M^* + I_c)] \\ u_b &= \xi \cdot (\alpha \psi^* + u_{d1} + u_{d2}) + \eta \cdot [\psi^* \cdot (\omega p_n + k_1 M^* + I_c)] \\ \dot{\eta} &= -\xi \cdot [\psi^* \cdot (\omega p_n + k_1 M^* + I_c)] \\ \dot{\xi} &= \eta \cdot [\psi^* \cdot (\omega p_n + k_1 M^* + I_c)] \end{aligned} \quad (6)$$

В режиме ослабления поля, алгоритм (6) модифицируется следующим образом

$$\begin{aligned} u_a &= \eta \cdot (\alpha \psi^* + u_{d1} + u_{d2}) - \xi \cdot u_0 \\ u_b &= \xi \cdot (\alpha \psi^* + u_{d1} + u_{d2}) + \eta \cdot u_0 \\ \dot{\eta} &= -\xi \cdot [\psi^* \cdot (\omega p_n + k_1 M^* + I_c)] \\ \dot{\xi} &= \eta \cdot [\psi^* \cdot (\omega p_n + k_1 M^* + I_c)] \end{aligned} \quad (8)$$

где u_0 – константа, определяемая напряжением в звене постоянного тока.

Алгоритм токоограничения формируется в виде:

$$\begin{aligned} I_c &= 0, \forall I_m \leq I_o \\ I_c &= k_o (I_o - I_m), \forall I_m > I_o. \end{aligned}$$

где I_m – модуль тока статора, I_o – значение токоограничения, k_o – настроечный коэффициент.

Результаты моделирования и экспериментального тестирования

Алгоритм управления моментом (1) – (3) исследован методом математического моделирования, для определения достигаемых диаграмм движения трамвая массой 55т с шестью двигателями мощностью 50 кВт каждый. На Рис. 2 показана диаграмма движения при разгоне и торможении с максимальным моментом, для случая номинального напряжения контактной сети (540 В). Условия теста подобраны с расчетом достижения трамваем максимальной скорости 75 км/ч. На Рис. 2 также показаны характерные точки, в которых начинается (заканчивается) режим ослабления поля.

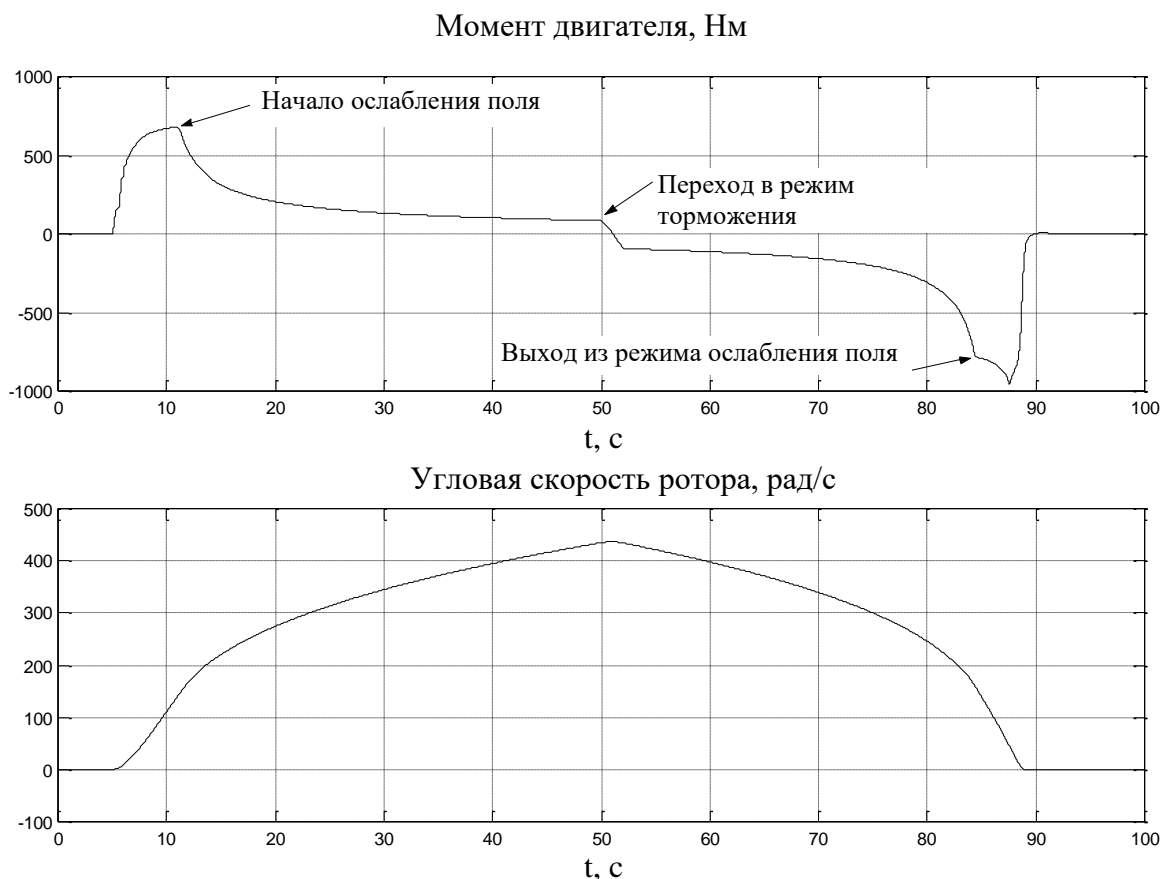


Рис. 2. Диаграмма движения при максимальном двигательном и тормозном моменте задания

Экспериментальное тестирование алгоритма управления моментом выполнялось на стенде, состоящем из: тягового асинхронного двигателя ТАД-21 мощностью 50 кВт, подключенного к стандартному инвертору

напряжения, датчика скорости на валу АД с разрешающей способностью 192 имп/об, нагрузочной машины (двигатель постоянного тока с независимым возбуждением).

При тестировании использовалась следующая последовательность управления. В начальный интервал времени АД возбуждается с использованием траектории заданного потока первого порядка (Рис. 2.). После окончания процесса возбуждения от двигателя требуется отработать заданную траекторию момента. В момент времени $t=8$ с задание на момент снимается, а через 1 с происходит развозбуждение АД и переход в режим свободного выбега. В момент времени, когда необходимо начать генерирование момента (13.5 с), выполняется повторное возбуждение машины с последующей отработкой заданного момента. В рассмотренном случае отрабатывается тормозной момент. Задающие траектории потокосцепления и скорости скольжения (пропорционально заданному моменту) показаны на Рис. 3. Графики переходных процессов соответствующие данному режиму показаны на Рис. 4-5. Напряжение в звене постоянного тока при рассмотренных тестах составляло 230 В.

На Рис. 6 показаны графики угловой скорости ротора при разгоне экспериментального вагона трамвая массой 40 т с использованием предложенной системы управления моментом. Графики изменения угловой скорости соответствуют разным заданиям на момент (70, 82, 100 и 118 % от номинального значения двигателя).

Из приведенных графиков переходных процессов видно, что предложенный алгоритм управления моментом обеспечивает регулирование момента АД с линейным законом изменения угловой скорости при работе с полным потоком. На экспериментальном стенде, при пуске АД, наблюдаются колебания тока и момента АД, что приводит к незначительным колебаниям скорости. На экспериментальном вагоне, ввиду существенного момента инерции, колебания скорости отсутствуют.

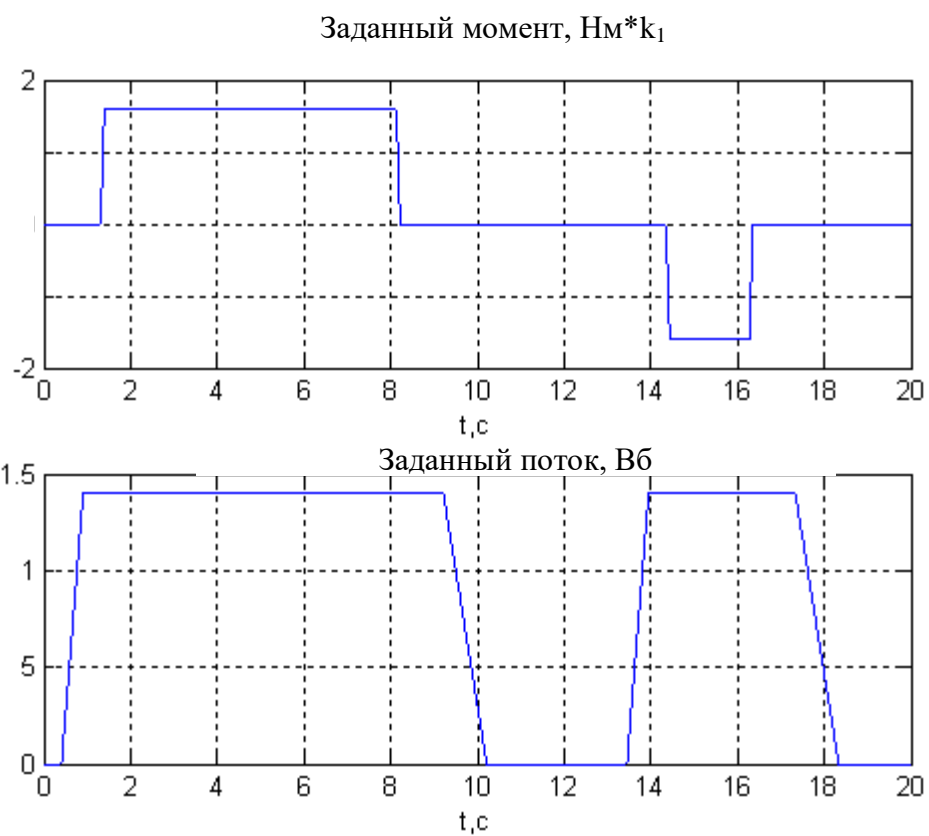


Рис. 2. Траектория заданного момента и потокосцепления

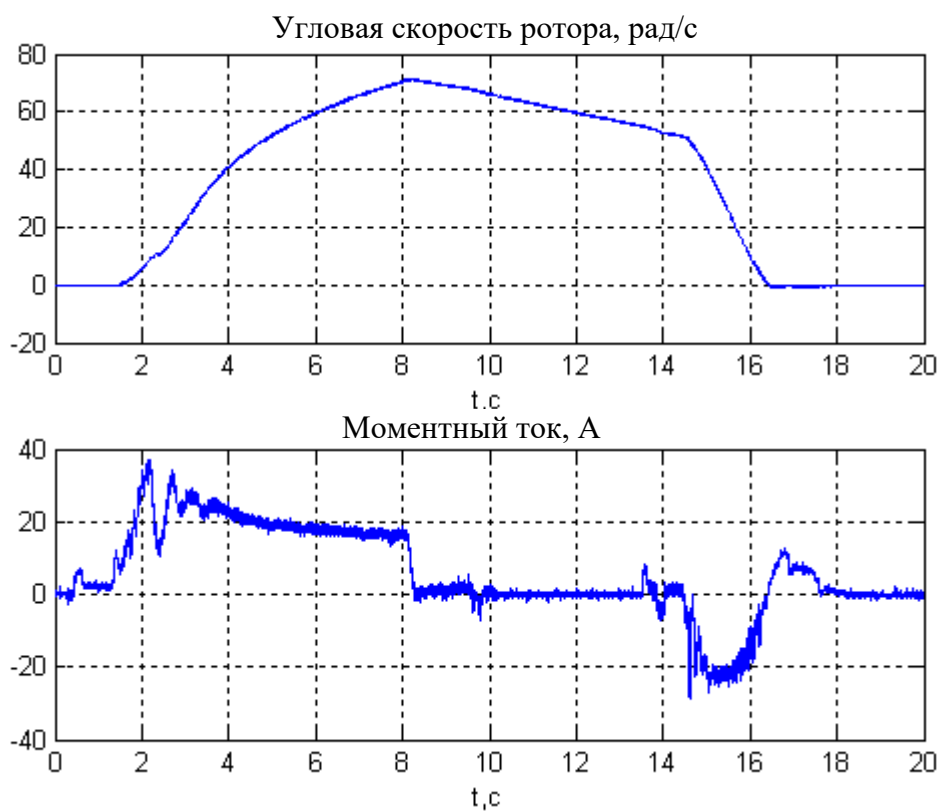


Рис. 3. Угловая скорость ротора и моментный ток

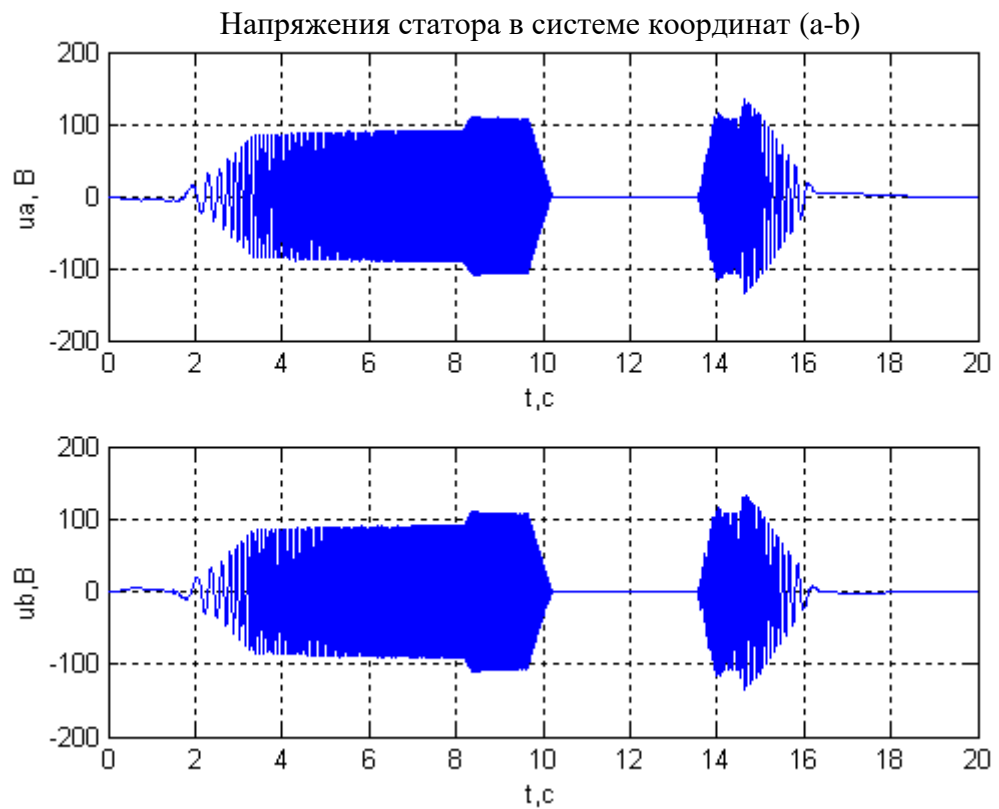


Рис. 4. Напряжения статора в стационарной системе координат

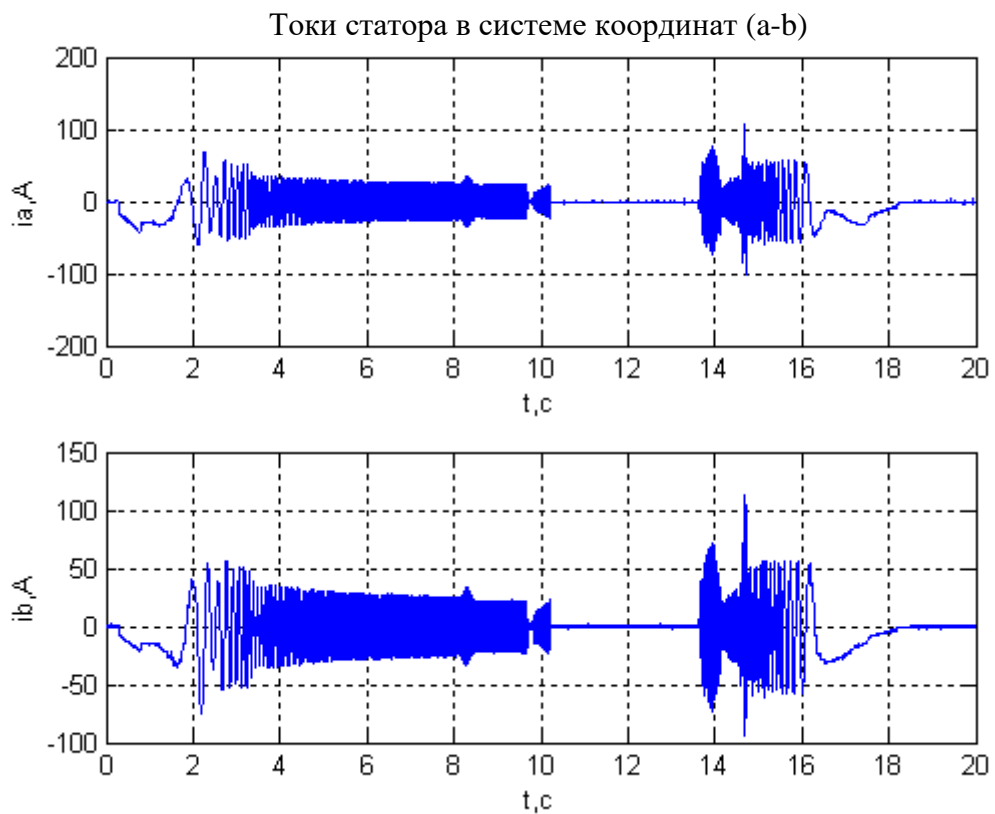


Рис. 5. Токи статора в стационарной системе координат

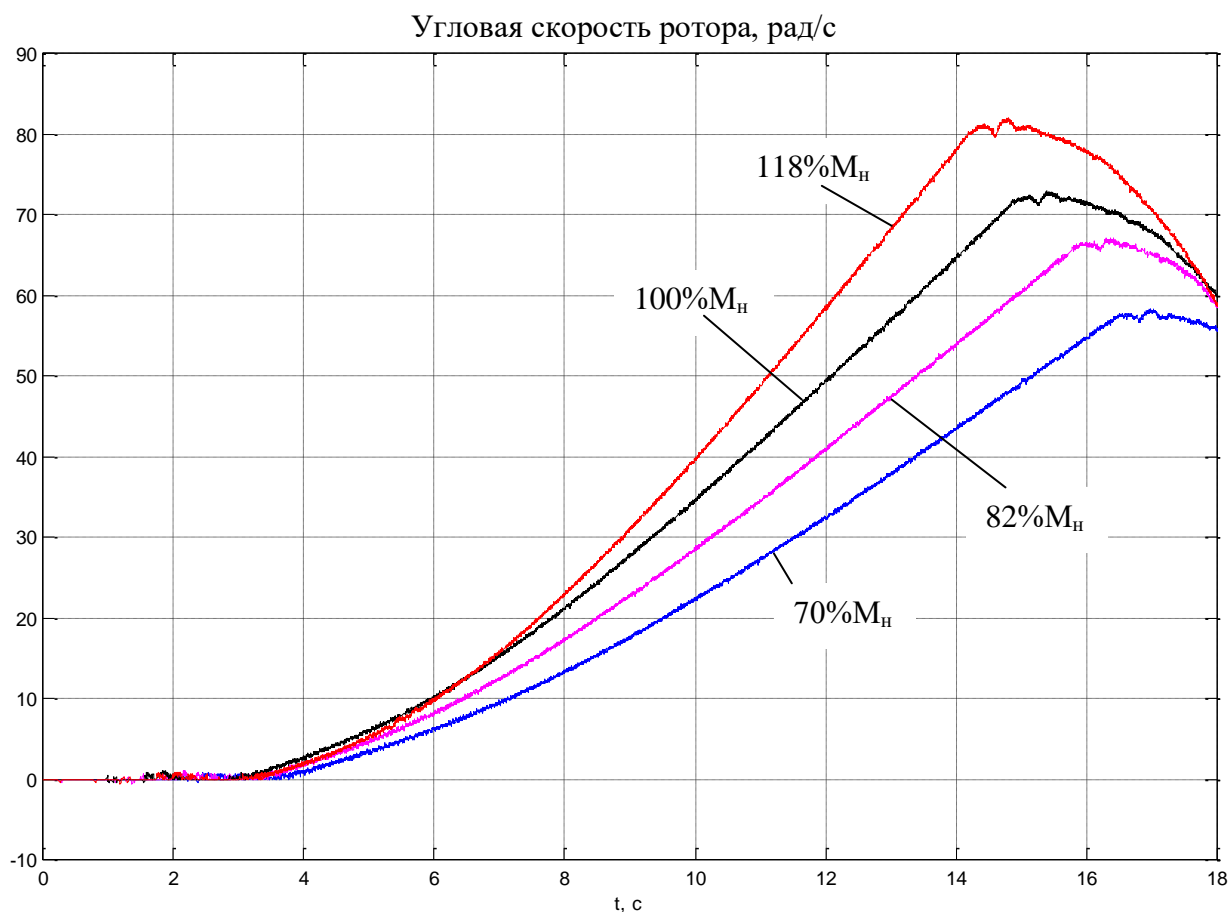


Рис. 6. Угловая скорость ротора при разгоне вагона трамвая

Заключение

Разработан и экспериментально исследован алгоритм регулирования момента АД, обеспечивающий: необходимые диаграммы движения трамвайного вагона, реализацию режима ослабления поля АД, развозбуждение машины при работе на выбеге, эффективное торможение АД до нулевой скорости.

Результаты экспериментального тестирования разработанного алгоритма управления моментом АД подтверждают результаты математического моделирования, полученные при аналогичных режимах работы.

Литература

[1] P. Escané, C. Lochot, M. David, B. de Fornel. Electromechanical interactions In a High Speed Railway Traction System Comparison Between Two Drive Control Structures. EPE '99 – Lausanne.

[2] J. Pierquin, P. Escané, A. Bouscayrol, M. Pietrzak-David, J. P. Hautier, B. de Fornel. Behavior Model Control Of A High Speed Railway Traction System. EPE-PEMC 2000. Vol. 6. pp. 197 – 202.

[3] www.el-drive.com.ua

[4] W. Leonhard, Control of Electrical Drives. Springer – Verlag, Berlin: 1996.